

СИЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ ТА МАГНІТНІ ПОЛЯ

УДК 621.318.4

А.В. ГНАТОВ, канд. техн. наук, доцент, ХНАДУ, Харьков

С.А. ШИНДЕРУК, аспирант, ХНАДУ, Харьков

Д.П. ПЕТРЕНКО, магистрант, ХНАДУ, Харьков

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ БЕСКОНТАКТНОЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РИХТОВКИ – СИММЕТРИЧНАЯ ИНДУКЦИОННАЯ ИНДУКТОРНАЯ СИСТЕМА

Проведен анализ электродинамических процессов и их расчет в универсальном инструменте бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки с одинаковыми тонкостенными листовыми ферромагнетиками, между которыми размещён круговой виток индуктора. По полученным аналитическим соотношениям выполнены численные оценки возбуждаемых усилий, которые производят деформирование (выравнивание) тонкостенного металла.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка металлов, индукторная система, электромагнитные процессы, тонкостенная листовая металл, рихтовка.

Постановка проблемы. Современное состояние технического развития общества предполагает переход к новым, соответствующим данному этапу развития, технологическим операциям. Выполнение данных операций, традиционными техническими методами, уже не представляется возможным. Это находит своё отражение в тех отраслях промышленности, например, автомобильной и авиационной, где необходим ремонт и восстановление тонкостенных металлических изделий, например, панелей кузовных элементов транспортных средств [1-3].

Разработки инструментов для магнитно-импульсного притяжения листовых металлов инициированы, производственными операциями по реставрации кузовных покрытий легковых автомобилей и корпусов самолётов. Здесь речь идет о восстановлении поврежденных металлических поверхностей, т.е. производится удаление вмятин, появившихся по тем или иным причинам в процессе эксплуатации. Причем, как показывает опыт, наибольший интерес вызывает возможность применения, так называемой, внешней рихтовки без разборки корпуса и нарушения существующего лакокрасочного покрытия [4]. Исполнитель-

© Гнатов А.В., Шиндерук С.А., Петренко Д.П., 2013

ными элементами такой операции выступают различной конструкции индукторные системы – инструменты бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки. Особое место среди таких инструментов занимают индукционные индукторные системы – универсальные инструменты.

Анализ основных достижений и публикаций. Индукционные индукторные системы впервые были предложены и описаны авторами работы [3]. Их первоначальное назначение состояло в создании сил магнитно-импульсного притяжения немагнитных металлов. Принцип действия был основан на взаимодействии проводников с одинаково направленными токами (закон Ампера). Таковыми являются собственно объект обработки – тонкий металлический лист и дополнительный конструктивный элемент индукторной системы – проводящий вспомогательный экран.

Из феноменологических соображений очевидно, что в универсальном инструменте с ферромагнитными элементами помимо сил притяжения, обусловленных законом Ампера, обрабатываемая заготовка будет испытывать также и притяжение, обусловленное магнитными свойствами её металла.

Электромагнитные процессы в универсальных инструментах на основе индукционных индукторных систем с вспомогательным экраном и листовой заготовкой из нержавеющей стали были исследованы авторами работ [4-6]. Очевидно, что системы с ферромагнитными составляющими представляют не меньший интерес в практике создания действенной инструментов для выполнения производственных операций рихтовки.

Априори, наиболее простой конструктивно и достаточно эффективной представляется индукционная индукторная система с идентичными тонкостенными листовыми экраном и заготовкой. Геометрическая и электродинамическая симметрия такой конструкции инструмента должна обеспечить квадратичную зависимость его силовых характеристик от параметров тока, возбуждающего систему.

Цель настоящего рассмотрения – расчет и анализ электродинамических процессов в универсальном инструменте бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки с одинаковыми тонкостенными листовыми ферромагнетиками, между которыми размещён круговой виток индуктора.

Анализ электродинамических процессов. Для анализа электромагнитных процессов примем расчётную модель в цилиндрической системе координат, показанную на рис. 1.

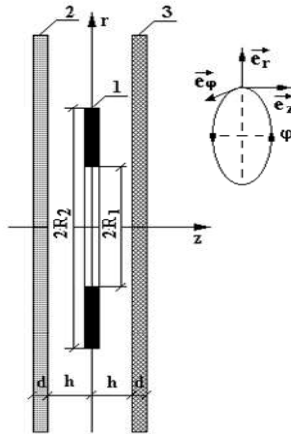


Рис. 1. Расчетная модель в цилиндрической системе координат ($\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z$ – направляющие орты), 1 – виток индуктора (R_1, R_2 – внутренний и внешний радиусы; 2 – экран (d – толщина); 3 – заготовка (d – толщина); h – расстояния от витка индуктора до экрана или заготовки).

При решении примем следующие допущения:

– Амплитудно-временные параметры тока индуктора $I(t)$ таковы, что справедливо квазистационарное приближение по Ландау [7]:

$\frac{\omega}{c} \cdot l \ll 1$, где ω – циклическая частота, c – скорость света в вакууме, l

– характерный размер системы;

– плоский виток индуктора имеет цилиндрическую форму (R_1, R_2 – внутренний и внешний радиусы), его толщина пренебрежимо мала, так что металл витка не оказывает никакого влияния на протекающие электромагнитные процессы;

– имеет место аксиальная симметрия ($\partial/\partial\varphi = 0$, φ – азимутальный угол) и симметрия системы относительно плоскости витка индуктора $z=0$;

– экран и заготовка есть одинаковые листовые металлы с довольно большими поперечными размерами, достаточно малой толщиной – d , электропроводностью – γ и абсолютной магнитной проницаемостью – $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ (μ_r – относительная магнитная проницаемость, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума), они расположены на одинаковом расстоянии от витка индуктора – h .

Уравнения Максвелла для возбуждаемых составляющих вектора электромагнитного поля ($E_\varphi \neq 0$, $H_{r,z} \neq 0$), преобразованных по Лапласу с учётом нулевых начальных условий, имеют вид [7, 8]:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} = j_\varphi(p, r, z); \\ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r, z)) = -\mu_c \cdot p \cdot H_z(p, r, z); \\ \frac{\partial E_\varphi(p, r, z)}{\partial z} = \mu_c \cdot p \cdot H_r(p, r, z), \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r, z)) = -\mu_c \cdot p \cdot H_z(p, r, z); \\ \frac{\partial E_\varphi(p, r, z)}{\partial z} = \mu_c \cdot p \cdot H_r(p, r, z), \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} = j_\varphi(p, r, z); \\ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r, z)) = -\mu_c \cdot p \cdot H_z(p, r, z); \\ \frac{\partial E_\varphi(p, r, z)}{\partial z} = \mu_c \cdot p \cdot H_r(p, r, z), \end{cases} \quad (3)$$

где p – параметр преобразования Лапласа;

$$E_\varphi(p, r, z) = L\{E_\varphi(t, r, z)\}; \quad H_{r,z}(p, r, z) = L\{H_{r,z}(t, r, z)\};$$

$$j_\varphi(p, r, z) = L\{j_\varphi(t, r, z)\}.$$

В общем случае плотность тока в правой части уравнения (1) записывается в виде:

$$j_\varphi(p, r, z) = (p \cdot \epsilon_0 + \gamma) \cdot E_\varphi(p, r, z) + j_{\varphi i}(p, r, z), \quad (4)$$

где $j_{\varphi i}(t, r, z)$ – плотность стороннего тока в индукторе,

$$j_{\varphi i}(p, r, z) = j(p) \cdot f(r) \cdot \delta(z), \quad j(p) = \frac{I(p)}{R_2 - R_1}; \quad I(p) = L\{I(t)\}, \quad I(t) – \text{ток}, \quad f(r)$$

– функция радиального распределения тока в витке индуктора; $\delta(z)$ – дельта-функция Дирака, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Решая полученные уравнения известными математическими методами [8], во избежание громоздкости в изложении, опустим промежуточные выкладки, и запишем окончательное выражение для искоемых величин возбуждаемых сил.

Нормальная компонента силы Лоренца (отталкивание),

$$F_{L\perp}(\varphi, r) = F_{Lm}(\varphi) \cdot \int_0^d I_1(r, \zeta) \cdot I_2(r, \zeta) d\zeta, \quad (5)$$

$$\text{где } F_{Lm}(\varphi) = \left(\frac{\omega \tau}{2d} \right) \cdot \frac{\mu_0}{2} \cdot j_m^2 \cdot \left(j(\varphi) \cdot \frac{dj(\varphi)}{d\varphi} \right),$$

$$I_1(r, \zeta) = \int_0^\infty \Phi_1(x) \cdot \left(sh \left(x \frac{\zeta - d}{d} \right) - \frac{1}{\mu_r} ch \left(x \frac{\zeta - d}{d} \right) \right) \cdot J_1 \left(x \cdot \frac{r}{d} \right) dx,$$

$$\Phi_1(x) = \frac{F(x)}{x^2 \cdot \left(sh(x) \left[sh\left(x \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} ch\left(x \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} e^{x \frac{h}{d}} ch(x) \right)},$$

$$I_2(r, \zeta) = \int_0^\infty \Phi_2(x) \cdot \left(ch\left(x \frac{\zeta - d}{d}\right) - \frac{1}{\mu_r} sh\left(x \frac{\zeta - d}{d}\right) \right) \cdot J_1\left(x \cdot \frac{r}{d}\right) dx,$$

$$\Phi_2(x) = \frac{F(x)}{x \cdot \left(sh(x) \left[sh\left(x \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} ch\left(x \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} e^{x \frac{h}{d}} ch(x) \right)},$$

$$F(x) = \int_{\left(x \cdot \frac{R_1}{d}\right)}^{\left(x \cdot \frac{R_2}{d}\right)} y \cdot J_1(y) dy \quad - \text{ для равномерного радиального распределения}$$

тока в индукторе.

Примечание. Функции $\Phi_{1,2}(x)$ устанавливают сходимость соответствующих несобственных интегралов в практических вычислениях.

Тангенциальная компонента силы Лоренца,

$$F_{Lm}(\varphi, r) = F_{Lm}(\varphi) \cdot \int_0^d I_1(r, \zeta) \cdot I_3(r, \zeta) d\zeta, \quad (6)$$

$$\text{где } I_3(r, \zeta) = \int_0^\infty \Phi_2(x) \cdot \left(sh\left(x \frac{\zeta - d}{d}\right) - \frac{1}{\mu_r} ch\left(x \frac{\zeta - d}{d}\right) \right) \cdot J_0\left(x \cdot \frac{r}{d}\right) dx.$$

Примечание. Зависимости $F_{Lm}(\varphi)$, $I_1(r, \zeta)$ – даны в формуле (5).

Силы притяжения в рассматриваемой индукционной индукторной системе – это сила притяжения листовой заготовки, обусловленная действием вспомогательного экрана (взаимное притяжение проводников с индуцированными токами), и сила притяжения, обусловленная магнитными свойствами металла собственно заготовки.

Силы притяжения листовых металлов с индуцированными токами в соответствии с законом Ампера описываются зависимостью [2, 4]:

$$F_A(\varphi, r) = F_{Am}(\varphi) \cdot \left(\int_0^\infty \Phi_3(x) \cdot J_1\left(x \frac{r}{d}\right) \cdot dx \right)^2, \quad (7)$$

$$\text{где } F_{Am}(\varphi) = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{r}{h} \left(j_m \cdot \frac{dj(\varphi)}{d\varphi} \cdot \frac{(\omega \cdot \tau)}{2} \right)^2,$$

$$\Phi_3(x) = \frac{F(x) \cdot \left((1 - \operatorname{ch}(x)) - \frac{1}{\mu_r} \cdot \operatorname{sh}(x) \right)}{x^3 \cdot \left(\operatorname{sh}(x) \cdot \left[\operatorname{sh}\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} \operatorname{ch}\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} e^{x \frac{h}{d}} \operatorname{ch}(x) \right)}.$$

Сила притяжения, обусловленная магнитными свойствами металла заготовки, описывается зависимостью [4]:

$$F_M(\varphi, r) = -F_{Mm}(\varphi) \cdot (\mu_r [Y_1(r) - Y_2(r)] + [Y_3(r) - Y_4(r)]), \quad (9)$$

$$\text{где } F_{Mm}(\varphi) = \frac{\mu_0}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{\mu_r} \right) \cdot j_m^2 \cdot j^2(\varphi),$$

$$Y_1(r) = \left(\int_0^\infty \frac{F(x) \cdot \left(\operatorname{sh}(x) + \frac{1}{\mu_r} \cdot \operatorname{ch}(x) \right) \cdot J_0\left(x \cdot \frac{r}{d}\right)}{x \cdot \left(\operatorname{sh}(x) \cdot \left[\operatorname{sh}\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} \operatorname{ch}\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} e^{x \frac{h}{d}} \cdot \operatorname{ch}(x) \right)} dx \right)^2,$$

$$Y_2(r) = \left(\frac{1}{\mu_r} \int_0^\infty \frac{F(x) \cdot J_0\left(x \cdot \frac{r}{d}\right)}{x \cdot \left(\operatorname{sh}(x) \cdot \left[\operatorname{sh}\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} \operatorname{ch}\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} e^{x \frac{h}{d}} \cdot \operatorname{ch}(x) \right)} dx \right)^2,$$

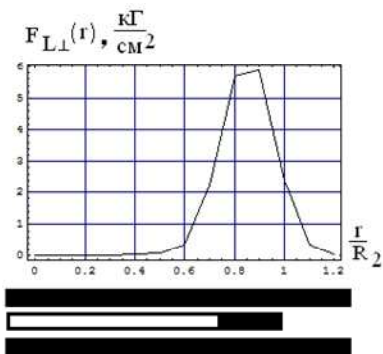
$$Y_3(r) = \left(\int_0^\infty \frac{F(x) \cdot \left(\operatorname{ch}(x) + \frac{1}{\mu_r} \cdot \operatorname{sh}(x) \right) \cdot J_1\left(x \cdot \frac{r}{d}\right)}{x \left(\operatorname{sh}(x) \cdot \left[\operatorname{sh}\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} \operatorname{ch}\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} \cdot e^{x \frac{h}{d}} \cdot \operatorname{ch}(x) \right)} dx \right)^2,$$

$$Y_4(r) = \left(\int_0^\infty \frac{F(x) \cdot J_1\left(x \cdot \frac{r}{d}\right)}{x \left(\operatorname{sh}(x) \cdot \left[\operatorname{sh}\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} \operatorname{ch}\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} \cdot e^{x \frac{h}{d}} \cdot \operatorname{ch}(x) \right)} dx \right)^2.$$

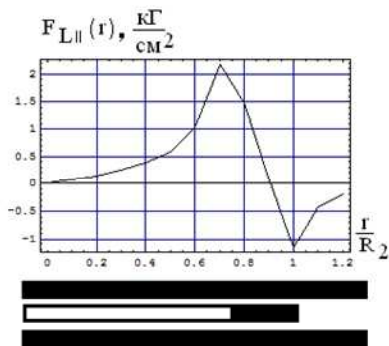
Численные оценки возбуждаемых усилий. Как следует из феноменологических соображений, в магнитных полях с напряженностями, достаточными для ощутимого силового воздействия ($\sim 10^5$ - 10^7 А/м), относительная магнитная проницаемость должна стремиться к единице. Справедливость такого предположения обоснована авторами работы [1, 4, 6]. Для определенности примем, что $\mu_r \approx 2,5$.

Для выяснения роли и влияния магнитных свойств экрана и заготовки на силовые характеристики рассматриваемой системы проведем расчеты для условий: $R_1 = 0,025$ м, $R_2 = 0,035$ м, $h = 0,001$ м, $f = 1150$ Гц, $\delta = 0,2$, $J_m = 50$ кА, $d = 0,00075$ м, $\gamma = 0,4 \cdot 10^7$ 1/Ом·м.

Результаты проведенных вычислений представлены на графиках ниже, рис. 2-5.

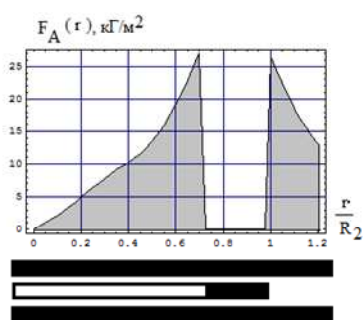


а

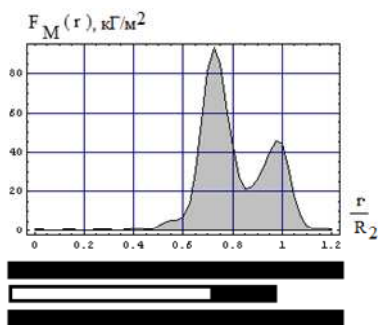


б

Рис. 2 – Радиальные распределения временных амплитуд компонент сил Лоренца для магнитных металлов, $\mu_r = 2,5$, а – нормальная z – компонента, б – тангенциальная r – компонента.



а



б

Рис. 3 – Радиальные распределения временных амплитуд возбуждаемых сил притяжения для магнитных металлов, $\mu_r = 2,5$, а – сила притяжения Ампера, б – сила магнитного притяжения.

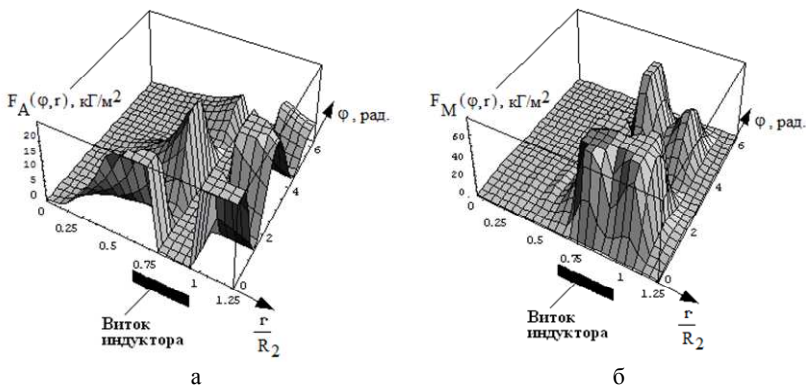


Рис. 4 – Объемные эпюры фазово-пространственного распределения временных максимумов возбуждаемых сил притяжения для магнитных металлов, $\mu_r = 2,5$, а – сила притяжения Ампера, б – сила магнитного притяжения.

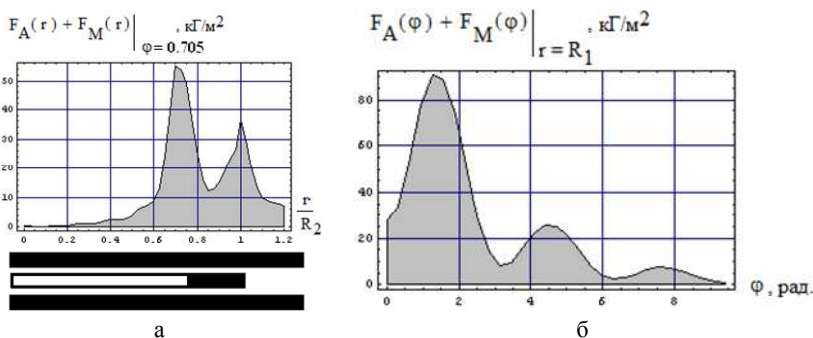


Рис. 5 – Графические зависимости суммарной силы притяжения в системе с магнитным экраном и заготовкой, $\mu_r = 2,5$, а – радиальное распределение в момент $\varphi = 0,705$ рад., б – фазовая зависимость для $r = R_1$.

Проведенные численные оценки следует дополнить следующими комментариями. Для иллюстративности помимо амплитудных значений следует привести усредненные силовые показатели. При расчёте последних в качестве границ интервалов усреднения примем значения радиальных координат, в пределах которых сосредоточены возбуждаемые силы. Подчеркнём, что оценка границ производится чисто визуально из графиков соответствующих распределений.

Так, среднее значение силы притяжения Ампера на интервале

$\frac{r}{R_2} \in [0,5; 2,5]$ соответственно составляет $\sim 78 \text{ кГ/см}^2$.

Усреднение силы магнитного притяжения на интервале $\frac{r}{R_2} \in [0,5; 1,2]$ согласно рис. даёт в результате $\sim 98 \text{ кГ/см}^2$.

Среднее значение суммарной силы притяжения (сила Ампера плюс сила магнитного притяжения) за время ее действия составляет $\sim 110 \text{ кГ/см}^2$.

Выводы. Основные результаты проведенных вычислений сводятся к следующим положениям.

1. Влияние магнитных свойств экрана и заготовки проявляется в появлении мощных сил магнитного притяжения.

2. Суперпозиция сил притяжения Ампера и сил магнитного притяжения в радиальных распределениях нивелирует "провал" силового действия на заготовку в области витка индуктора.

3. В целом, притяжение ферромагнетика в рассматриваемом универсальном инструменте бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки оказывается достаточно эффективным. Током индуктора с временной зависимостью в виде экспоненциально затухающей синусоиды с амплитудой $\sim 37 \text{ кА}$ возбуждаются силы притяжения порядка $35\text{--}80 \text{ кГ/см}^2$.

4. Оценка усредненных силовых показателей показала, что среднее значение суммарной силы притяжения (сила Ампера плюс сила магнитного притяжения) за время ее действия может составить $\sim 110 \text{ кГ/см}^2$.

Список литературы: 1. Батыгин Ю.В. Расчет электродинамических процессов в согласующем устройстве цилиндрического типа с двумя разомкнутыми вторичными витками / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, И.С. Трунова // Вестник ХНАДУ. – Х.: ХНАДУ. – 2012. – В. 56. – С. 30-36. 2. Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Магнитно-импульсные технологии бесконтактной рихтовки кузовных элементов автомобиля: монография / А.В. Гнатов, Ю.В. Батыгин, Е.А. Чаплыгин. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012 – 242 с. 3. Батыгин Ю.В. Притяжение тонкостенных металлических листов магнитным полем одновиткового индуктора / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, С.А. Щиголева // Электричество. – М., 2011. – № 4. – С. 55-62. 4. Туренко А.Н. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3 Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: Монография – Х: ХНАДУ, 2009. – 240 с. 5. Гнатов А.В. Силы притяжения в системе с одновитковым соленоидом, массивным экраном конечной толщины и

тонкостенной листовой заготовкой / *А.В. Гнатов* // *Электротехника і електромеханіка*. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2010. – № 4.– С. 49-51. **6.** *Гнатов А.В.* Электромагнитные процессы в индукционной индукторной системе с одновитковым соленоидом, массивным экраном и тонкостенной листовой заготовкой / *А.В. Гнатов* // *Электротехника і електромеханіка*. – Х. : НТУ "ХПІ". – 2009. – № 6. – С. 46-49. **7.** *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. – М: Наука. 1982. – 620 с. **8.** *Дж. Мэтьюз, Р. Уокер.* Математические методы физики. Пер. с англ. Крайнова В.П. – М: Атомиздат. 1972. – 399 с.

Поступила в редколлегию 20.05.2013

УДК 621.318.4

Универсальный инструмент бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки – симметричная индукционная индукторная система / Гнатов А.В., Шиндерук С.А., Петренко Д.П. // *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 51 (1024). – С. 106-116. Бібліогр.: 8 назв.

Проведен анализ электродинамических процессов и их расчет в универсальном инструменте бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки с одинаковыми тонкостенными листовыми ферромагнетиками, между которыми размещён круговой виток индуктора. По полученным аналитическим соотношениям выполнены численные оценки возбуждаемых усилий, которые производят деформирование (выравнивание) тонкостенного металла.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка металлов, индукторная система, электромагнитные процессы, тонкостенная листовая металл, рихтовка.

The analysis of the electrodynamic processes and their calculation in the universal tool of non-contact magnetic pulse alignment with identical ferromagnetic thin-sheet, between which a circular spiral inductor is placed is carried out. According to the obtained analytical relations numerical estimates of excited forces that produce deformation (flattening) of thin-walled metal are performed.

Keywords: magnetic pulse metal working, induction system, electromagnetic processes, thin-walled sheet metal straightening.